

外98-45

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

マイクロ波移動体衛星通信および
無線電力伝送用アレーアンテナの
高性能化に関する研究

申請者

大塚 昌孝

Masataka Ohtsuka

1998年12月
(西暦)

1. 序論

アレーアンテナは複数の素子アンテナを配列し、各素子アンテナの励振振幅・位相を調整することで、所望の放射特性を得ようとするアンテナである。このアレーアンテナは素子アンテナの種類、配列方法、励振方法等によって単一の素子アンテナでは実現できない種々の機能を有している。本論文の目的は、近年盛んに研究されている移動体衛星通信および無線電力伝送の分野におけるアレーアンテナ技術の応用と改善である。まず第2章ではマイクロ波移動体衛星通信の車載端末用アンテナとして用いられている多線巻きヘリカルアンテナのビーム方向周波数特性の改善について述べる。アレー化した多線巻きヘリカルアンテナを提案し、従来よりビーム方向周波数特性が改善されることを示す。第3章ではマイクロ波無線電力伝送の受電設備として用いられるレクテナアレーの受電特性の高効率化について述べる。まず、レクテナ単体の性能向上のために、高整流効率を得るレクテナ整流回路の構造について述べ、従来の報告より高い性能を得られることを実験的に明らかにする。次に有限レクテナアレーの素子間隔と受電効率の関係を検討する。両者の関係を素子アンテナ間相互結合を考慮した理論で求め、実験結果と良く対応することを示す。また、これらの結果から最大受電効率を得る素子間隔を明らかにする。第4章では移動体衛星通信および無線電力伝送で衛星や移動体の方向検出に適しているモノパルス方式フェーズドアレーアンテナ（以下モノパルスフェーズドアレー）のビーム方向検出精度について検討を行う。まず各素子アンテナの設定位相誤差とビーム方向誤差の関係を統計的手法で明らかにし、今まで検討例が見当たらない開口振幅分布付きフェーズドアレーの場合について見通しの良い評価式を導出する。また、各素子アンテナの励振位相を計算する演算機の精度と、フェーズドアレーで実現できるビーム方向最小変化量の間関係を理論的に明らかにする。さらにこれらの理論を実験とシミュレーションで検証する。

2. マイクロ波移動体衛星通信用多線巻きヘリカルアンテナのアレー化によるビーム方向周波数特性の改善

本章では2素子ヘリカルアレーアンテナを提案し、従来の多線巻きヘリカルアンテナのビーム方向周波数特性が改善されることを示す。多線巻きヘリカルアンテナは仰角方向にビームチルトし、水平方向に無指向となるコニカル状の円偏波放射パターンを有している。そのため、北米のMSATシステムや日本のN-S-TARシステムのように静止衛星を利用した移動体衛星通信では、衛星追尾装置がいない車載アンテナとして検討、実用化されている。しかしこのアンテナは周波数によってビーム方向が変動する特性を有し、周波数の異なる送信と受信の共用で用いた場合、どちらかで利得が低下する弱点がある。このビーム方向周波数特性を改善する方法として多線巻きヘリカルアンテナのアレー化を提案した。

これは各ヘリカル素子から放射される電波の電氣的な行路長を、給電回路を含めて所望のビーム方向で一定にすることで、放射パターンにおけるアレーファクタのビーム方向が周波数によって変動しなくなる性質を利用したものである。ヘリカル直径 0.12λ 、アンテナ高 4.83λ (λ :波長)の2線巻きヘリカルで計算を行った結果、周波数比帯域8.6%において、従来の2線巻きヘリカルは 11.5° のビーム方向変動を生じた。さらに帯域内の最低および最高周波数の放射パターンが交差する方向の利得（通常これが衛星方向であり、以下交差点利得）はピーク利得に対して1.3dB低下した。これに対して同寸法の2素子ヘリカルアレーアンテナではビーム方向変動は 2.2° 、交差点利得は従来の2線巻きヘリカルより2dB向上した。またL帯で試作したアンテナの実験から、計算結果を実証した。以上の結果より提案のアンテナの有効性が明らかにされた。

3. 無線電力伝送用レクテナアレーの受電特性の高効率化

この章ではレクテナ単体の高効率化と有限レクテナアレーの最適素子間隔について示す。近年太陽光衛星発電システムや成層圏無線中継システムで、大気減衰の少ないマイクロ波を用いた無線電力伝送が検討されている。レクテナアレーはこれらの無線電力伝送で用いられる受電設備であり、レクテナとはマイクロ波を直流に変換する整流回路と受信アンテナを接続した素子である。レクテナアレーの素子数を減らすには、一素子当たりの入力電力を高くする必要があるが、従来の検討では500mW以上のマイクロ波入力において整流効率は60%程度に止まっていた。また、素子数を減らしてかつマイクロ波を無駄なく受電するためには、最適素子間隔の検討が必要であるが、有限素子数のレクテナアレーの最適素子間隔については検討例が見当たらない。そこでまずレクテナ単体の高効率化のために、基本波を通過させて高調波を阻止する入力フィルタと直流成分のみを通過させる出力フィルタで整流用ダイオードを挟む構造の整流回路を試作した。実験の結果、入力500mWで75.7%、750mWで66.7%の整流効率を得、従来の報告より高い性能を実現した。次に有限レクテナアレーの最適素子間隔については、動作時における各素子アンテナの端子電流を求める連立方程式を導出し、各素子アンテナ間の相互インピーダンスが求まれば受電効率が計算できることを示した。これを実証するために、相互インピーダンスの計算ができる円形マイクロストリップアンテナ（以下円形MSA）を用いたレクテナアレーの受電実験を行った。方形配列 5×5 素子レクテナアレーの最大受電効率は実測値、計算値ともにH面方向素子間隔 $0.5\lambda \times$ E面方向素子間隔 0.7λ (λ :波長)で得られ、実測値60.1%、計算値65.1%であった。また最大受電効率から5%程度の低下を許容するなら $0.8\lambda \times 0.7\lambda$ まで素子間隔を拡大できることがわかった。レクテナの各部損失を考慮すると、受電効率が最大になる素子間隔では入射マイクロ波の96%が円形MSAアレーに捕集されていると見積も

られる。0.8λ×0.7λより小さい素子間隔では、実測値と計算値は6%以内で対応したが、相互インピーダンスの計算で2次以上の結合を考慮していないことがこの差の原因の1つと考えられる。以上の結果から方形配列円形MSAレクテナアレーの最適素子間隔が判明し、また先の受電効率計算理論で有限レクテナアレーの動作が解析できることが示された。

4. マイクロ波移動体衛星通信および無線電力伝送における電波到来方向検出用モノパルスフェーズドアレーのビーム方向精度

この章ではモノパルスフェーズドアレーの各素子アンテナの設定位相誤差とビーム方向誤差の関係、およびデジタル移相器、演算機の精度(ビット数)と実現できる最小ビーム方向変化量との関係を明らかにする。モノパルス方式はフェーズドアレーの差パターンナル点方向(ビーム方向)からの離角で、電波の到来方向を測定する方法であり、高速かつ高精度に方向を検出できる。このため移動体衛星通信や無線電力伝送における衛星や移動体の方向検出に 응용が期待される。モノパルスフェーズドアレーにおける各素子アンテナの設定位相誤差とナル点方向誤差の関係を検討した報告は少なく、特にサイドローブを低減するためにアンテナ開口に振幅分布を設けた場合の検討は見当たらない。また、各素子アンテナの設定位相を計算する演算機の精度と最小ビーム方向変化量の検討も見当たらない。そこで前者に対しては、ナル点近傍における差パターンの近似式をもとめ、これから設定位相誤差とビーム方向誤差の標準偏差の関係式を示した。特にテーパ状開口振幅分布を持つアレーではこの分布を2次関数で近似し、素子位置情報がなくても誤差評価できる見通しの良い式を示した。4×4素子の円形テイラー分布アレーのシミュレーションで、この式とシミュレーションの結果が5%以内で対応し、理論の妥当性が実証された。また上記差パターン近似式から移相器、演算機のビット数と実現できる最小ビーム方向変化量との関係式を求め、1×1×2素子間引きアレーのシミュレーションと実験から理論の妥当性が実証された。

5. 結論

以上、移動体衛星通信および無線電力伝送におけるアレーアンテナ技術の応用と改善の研究結果について述べた。第2章で提案したアンテナは移動体衛星通信の車載アンテナとして大変有益である。また成層圏無線中継システムの無線中継基地である飛行船や無人飛行機への電力伝送に使用できる有限レクテナアレーの設計に第3章の研究結果は有益である。第4章の研究結果は移動体衛星通信および無線電力伝送の電波到来方向検出装置やレーダとして使用できるモノパルスフェーズドアレーの評価、およびその構成部品の設計精度決定に有益である。今後ますます盛んに研究・実用化されるであろう移動体衛星通信、無線電力伝送において本研究の成果が生かされるものと考えられる。